

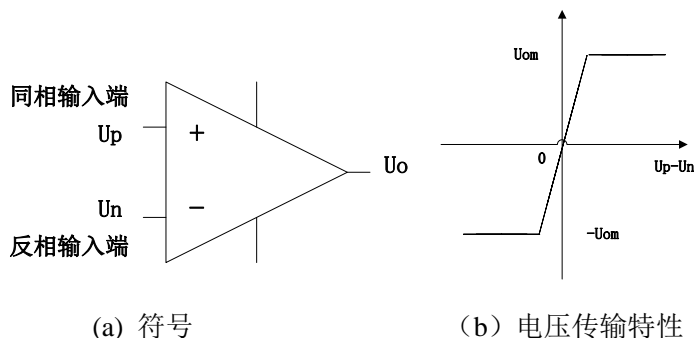
# 集成运算放大器&电压比较器&电压跟随器

## 目录

1. 集成运算放大器基础 .....	2
2. 基于理想运放的分析 .....	2
3. 基础运放电路分析 .....	3
4. 运放的基础应用要求.....	4
5. 电压比较器 .....	11
6. 电压跟随器 .....	14

## 1. 集成运算放大器基础

集成运放有同相输入端和反向输入端，从外部看，集成运放是一个双端输入，单端输出，基友高差模放大倍数，高输入电阻，低输出电阻，能较好的抑制温漂的差分放大电路。



集成运放的输出电压  $U_o$  与输入电压（即同相输入与反向输入端之间的电位差）（ $U_p - U_n$ ）之间的关系曲线被称为电压传输特性。

$$U_o = f(U_p - U_n)$$

对于正负两路电源供电的集成运放，电压的传输特性如图（b），集成运放包含线性区和非线性区两部分，线性区，曲线的斜率为电压放大系数，非线性区，输出电压只有两种可能， $+U_{om}$  或  $-U_{om}$ 。

由于集成运放放大的是差模信号，且没有通过外电路引入反馈，故称电压放大倍数为差模开环放大倍数，记做  $A_{od}$ ，当集成运放工作在线性区时

$$U_o = A_{od}(U_p - U_n)$$

## 2. 基于理想运放的分析

利用集成运放作为放大电路，可以引入各种组态的负反馈，在分析集由集成运放组成的负反馈放大电路时，通常将其性能指标理想化，看做一个理想运放。

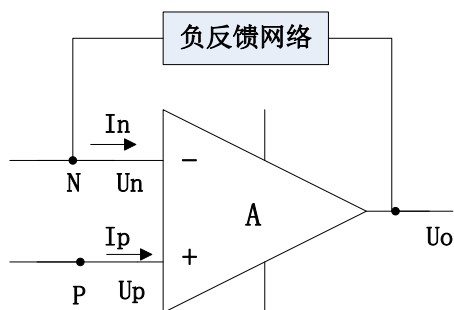
理想运放的性能指标：

- 1) 开环差模增益（放大倍数） $A_{od} = \infty$ 。
- 2) 差模输入电阻  $R_{id} = \infty$ 。
- 3) 其他

设集成运放的同相输入端和方向输入端电位分别是  $U_p$  和  $U_n$ ，电流分别为  $I_p$  和  $I_n$ ，当集成运放工作在线性区时有  $U_o = A_{od}(U_p - U_n)$ ，因为  $A_{od}$  无穷大，要使  $U_o$  为有限值，则  $U_p = U_n$ ，即虚短路，同时又因为理想运放的输入电阻为无穷大，所以两个输入段的电流也均为 0，即  $I_p = I_n = 0$ 。称为虚断路。

综述：分析由运放组成的应用电路时，基于理想运放的两个条件来分析： $U_p = U_n$  和  $I_p = I_n = 0$ 。

引入负反馈：对于理想运放，由于  $A_{od}=\infty$ 。因而即使两个输入端之间加微小电压，输出电压都将超出线性范围，输出电压不是  $+U_{om}$  就是  $-U_{om}$ 。所以电路要引入负反馈，使净输入量趋于 0，才能保证集成运放工作在线性区。

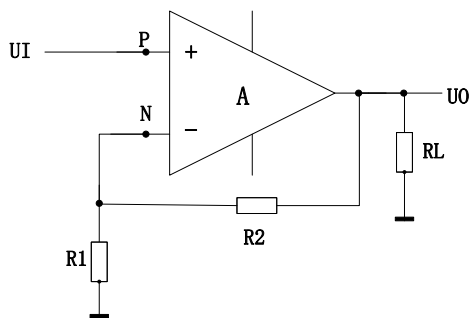


运放应用电路分析基础：  $U_n=U_p$ ；  $I_n=I_p=0$ 。

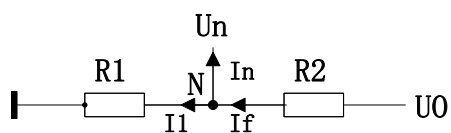
### 3. 基础运放电路分析

基于运放的应用电路分析基础，两个理想运放条件：  $U_n=U_p$ ；  $I_n=I_p=0$ 。

#### 1) 电压串联负反馈电路



等效电路：



对于 N 点，利用电流守恒定律即输入电流等于输出电流来分析：  $I_f=I_1+I_n$

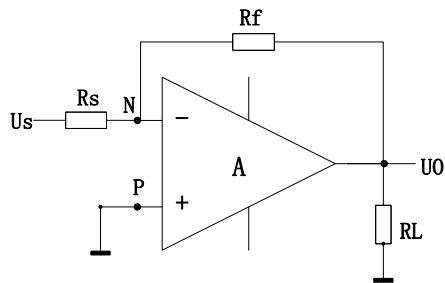
其中  $I_f= (U_o-U_n) / R_2$ ；  $I_1=U_n/R_1$

基于理想运放分析我们可知：  $U_n=U_p=U_i$ ；  $I_n=I_p=0$ ；

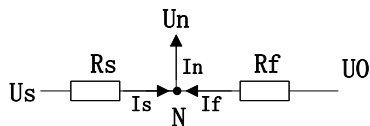
所以  $(U_o-U_i) / R_2= U_i/R_1$  ；

所以可得输出电压与输入电压的关系：  $U_o=U_i* (R_1+R_2) / R_1$

#### 2) 电压并联负反馈电路



等效电路：



对于 N 点，利用电流守恒定律即输入电流等于输出电流来分析： $I_n = I_s + I_f$

其中  $I_s = (U_s - U_n) / R_s$ ； $I_f = (U_o - U_n) / R_f$ ；

基于理想运放分析我们可知： $U_n = U_p = 0$ ； $I_n = I_p = 0$ ；

所以  $U_s / R_s + U_o / R_f = 0$

所以可得输出电压与输入电压的关系： $U_o = -U_s * R_f / R_s$

3) 电流串联负反馈电路

4) 电流并联负反馈电路

分析方法同上

综述：分析基于运放的应用电路，首先两个理想运放条件： $U_n = U_p$ ； $I_n = I_p = 0$ 。然后可以画出反馈电路的等效电路，基于 N 点的电流守恒来经行计算分析，最后得出输出电压与输入电压的关系。

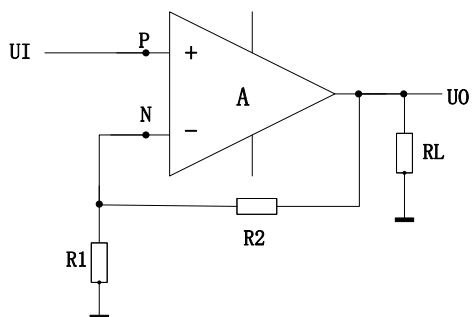
#### 4. 运放的基础应用要求

1) 运放分析的两个理想条件： $U_n = U_p$ ； $I_n = I_p = 0$ 。

2) 将理想放大器条件下的电压同相和反向放大电路画出来，写出电压传递公式

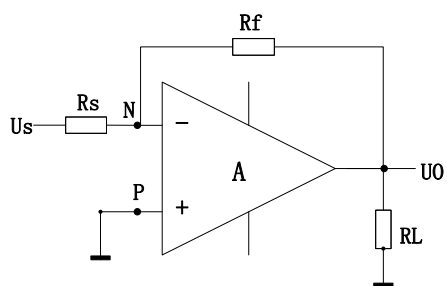
① 同相放大电路：输入电压  $U_i$  作用于运放的同相输入端

输出电压与输入电压的关系： $U_o = U_i * (R_1 + R_2) / R_1$



② 反向放大电路：输入电压  $U_i$  作用于运放的反相输入端

输出电压与输入电压的关系： $U_o = -U_s \cdot R_f / R_s$



3) 实际 Op 中，存在单电源供电和双电源供电的产品，其使用条件有什么异同？

双电源供电运放：供电电源  $+V$  和  $-V$ 。

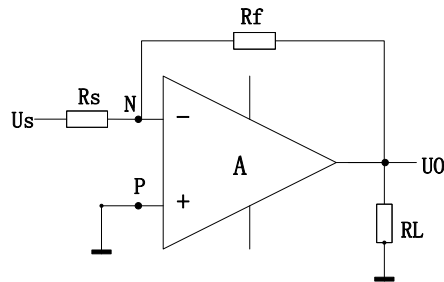
单电源供电运放：供电电源  $+V$ ，地。

差异：

性能参数	双电源	单电源
供电电源限制	大于 10V 时表现出色 小于 10V 时性能受限	小于 10V 时表现出色 大于 10V 时性能受限
输出电压范围	受限制	大
输入电源范围	受限制	大
总动态范围	大	小
输出电压/电流	较大	较小
精度	高	较低（正在提高）
负载抗扰性	好	差
可选型号	较多	较少（正在增多）

**供电电源如何选择（如何选择运放）：p10** 高性能运算放大电路中，采用 rail to rail 轨到轨设计较好（详见（10）轨到轨的解释）。双电源（+V，-V）供电时，输入输出共模电压在 -V~+V 之间。单电源供电（+V，地），输入输出共模电压在 0~+V 之间。（共模/差模电压：共模和差模其实没有严格的定义。只是说共模是相对于公共地而言的信号，而差模则是两个信号的差（注意这里没有强调公共地。例：设差分信号线的正端电压为  $V_p$ ，负端电压为  $V_n$ 。自然你可以定义  $V_p$  或  $V_n$  为共模电压（都相对于公共地），而  $V_p - V_n$  为差模电压。）

— 这里 rail to rail 运放，在供电电源范围内的输入输出共模电压应该分别是  $U_p$ ， $U_n$ ， $U_o$ 。而不是  $U_s$  等电路输入电压。



输入共模=  $(V_{in+} + V_{in-})/2$ ;

输入差模=  $(V_{in+} - V_{in-})/2$ ;

输出共模=  $(V_{out+} + V_{out-})/2$ ;

输出差模=  $(V_{out+} - V_{out-})/2$ ;

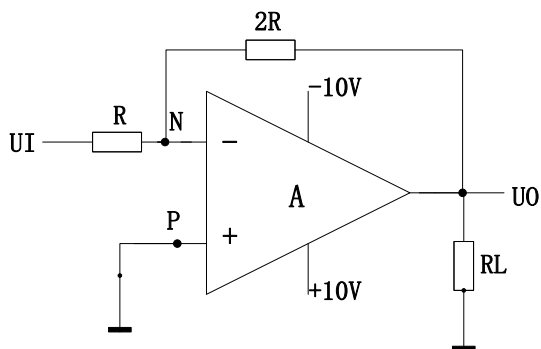
共模增益= 输出共模/输入共模;

差模增益= 输出差模/输入差模;

4) 给定条件，输入信号电源幅度范围 1~3V，要求得到线性放大到-2~-6 输出电压，应该如何选用 Op（供电）？画出原理图。

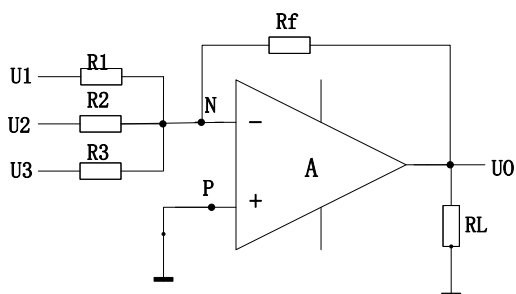
输出电压与输入电压关系： $U_o = -2U_i$

电源选择：因为输出是-2~-6V，采用 Rail to Rail 设计，供电电源选择双电源模式（+10V，-10V）

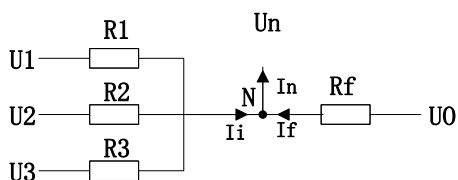


5) Op Amp (运放) 为何称为“operational”? 给出一个电路的例子

Operational (可操作的): 运放电路可以通过设计不同的电路来进行不同的输出电压运算。例:



等效电路:



对于 N 点, 利用电流守恒定律即输入电流等于输出电流来分析:  $I_n = I_i + I_f$

$I_i = (U_1 - U_n) / R_1 + (U_2 - U_n) / R_2 + (U_3 - U_n) / R_3$ ;  $I_f = (U_o - U_n) / R_f$ ;

基于理想运放分析我们可知:  $U_n = U_p = 0$ ;  $I_n = I_p = 0$ ;

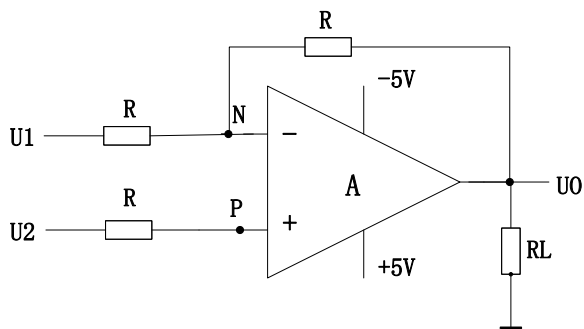
所以可得  $(U_1/R_1 + U_2/R_2 + U_3/R_3) + U_o/R_f = 0$ ;

所以可得输出电压与输入电压的关系:  $U_o = - (U_1 \cdot R_f/R_1 + U_2 \cdot R_f/R_2 + U_3 \cdot R_f/R_3)$ ;

综上: 可以得到该运放电路的输出电压的运算方式。  $Y = -(ax_1 + bx_2 + cx_3)$ ;

6) 给定条件: 输入信号电压范围 1~3V, 要求得到线性放大到 -2~2V 输出电压, 应该如何选用

Op (供电)? 画出原理图。



可以得到  $U_o = 2U_2 - U_1$ ；当  $U_1 = 4V$  时， $U_2$  电压范围  $1 \sim 3V$ ，可以得到输出  $U_o$  范围  $-2 \sim 2V$ 。

7) 简单的说明下  $O_p$  电路的输入和输出阻抗在一个什么数量级上？

输入阻抗：可分为共模输入阻抗（指任何一个输入端到地的阻抗），差分输入阻抗（两个输入端之间的阻抗），输入阻抗通常都呈阻性并且很大（ $10^5 \sim 10^{12} \Omega$ ）（理想运放为无穷大）。

输出阻抗：输出阻抗很低，趋于 0（理想运放为 0），便于对信号的传递和耦合。

8) 普通  $O_p$  对于电容性负载的复合能力如何？

9) 说明  $O_p$  参数：带宽增益积，偏置电压，偏置电流，开环增益的具体物理含义？

**带宽增益积：**带宽跟闭环增益（有反馈情况下的电压放大倍数）的乘积，带宽指-3db 带宽即开环增益  $A_{od}$  下降到 3db（下降到约 0.707）是的信号频率  $f_H$ ，当信号频率升高到  $f_H$  时，运放中电容容抗变小，使信号受到损失，导致  $A_{od}$  数值下降且产生相移。

**偏置电压：**失调电压，实际情况中，当运放的输入电压为 0 时，输出电压  $U_o$  不为 0，这是由于制造中元件参数的不对称原因引起的。把输入电压为 0 时的输出电压  $U_o$  除以放大倍数即位失调电压  $U_{IO}$ ， $U_{IO} = U_o|_{U_i=0} / A_{od}$ 。 $U_{IO}$  越小表明电路参数对称性越好。

**偏置电流：**理想运放的输入阻抗无穷大，因此不会有电流流入输入端。但是，在输入级中使用双极晶体管(BJT)的真实运放需要一些工作电流，该电流称为偏置电流( $I_B$ )。通常有两个偏置电流： $I_{B+}$  和  $I_{B-}$ ，它们分别流入两个输入端。这两个偏置电流之差为输入失调电流  $I_{OS}$ ，通常情况下  $I_{OS}$  很小。偏置电流越小越好。

**开环增益：**指无反馈情况下差模电压的放大倍数  $A_{od}$ ， $A_{od} = U_o / (U_+ - U_-)$  其值越大越好，一般为  $10^4 \sim 10^6$  即 80~120DB。（闭环增益：有反馈情况下的电压放大倍数， $A = U_o / U_i$ ）

10) 说明 R-R  $O_p$  的具体含义

R-R 轨到轨运放，双电源 (+V, -V) 供电时，输入输出共模电压在 -V~+V 之间。单电源供电 (+V,



地)，输入输出共模电压在  $0 \sim +V$  之间。（见《运算放大器应用手册》P10）

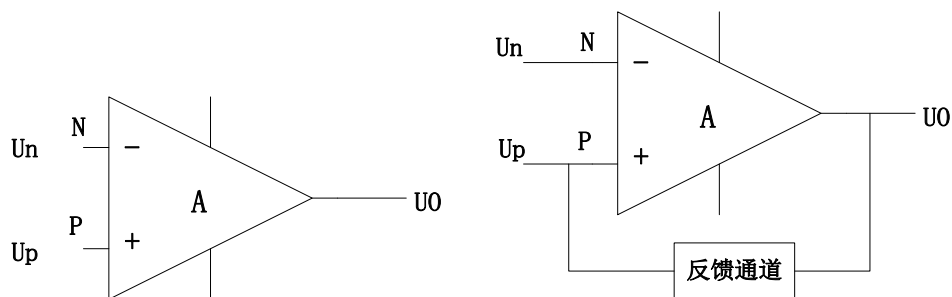
11) 以 LM385 为例，如果在 +5V 供电条件下，要求得到  $0 \sim 5V$  的电压输出，是否可行？

只能接近 0V，5V，不能达到。

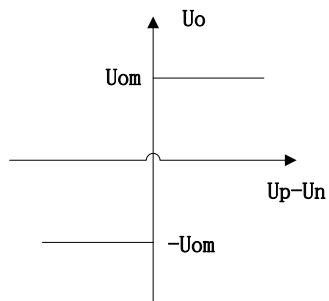
12) 通常所说的“电压比较器”，其工作特性是怎么样的，用通用 Op 如何实现？

电压比较器：将输入电压与参考电压进行比较，然后输出低电平或者高电平代表的两种电压。

电压比较器电路是使通用运放开环或者引入正反馈来实现，使运放工作在非线性区。

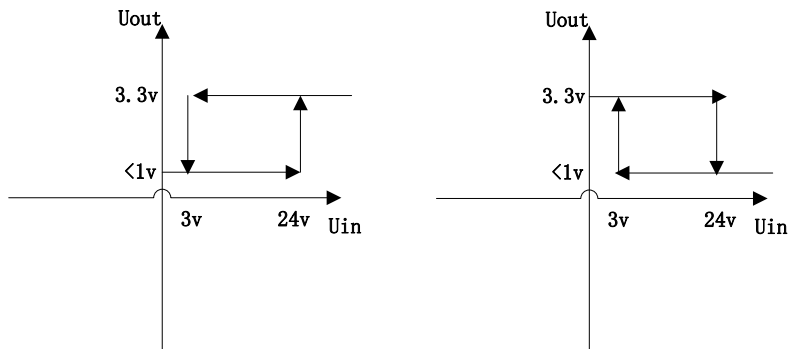


集成运放工作在非线性区电压特性

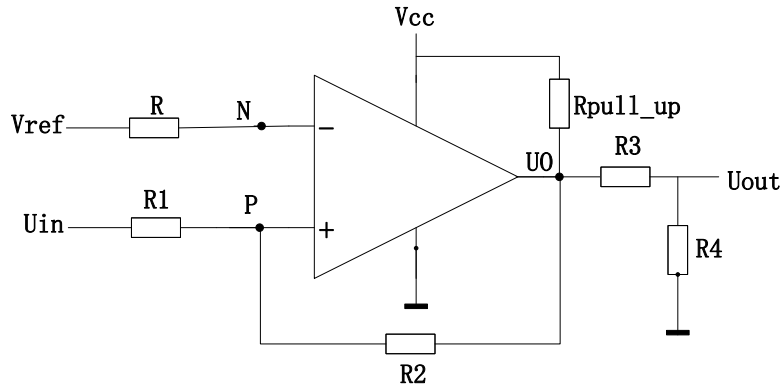


当集成运放工作在线性区时， $U_p > U_n$  时，输出电压  $U_o = +U_{om}$ ，当  $U_p < U_n$  时，输出电压  $U_o = -U_{om}$ 。

13) 以 LM339 为例，按照下面的要求设计电路并计算出参数：



①



通过计算

$$V_{in1} = \frac{V_{ref}(R_1 + R_2)}{R_2} = U_{T2} = 24 \quad \text{-----①}$$

$$V_{in2} = \frac{V_{ref}(R_1 + R_2) - V_{CC}R_1}{R_2} = U_{T1} = 3 \quad \text{-----②}$$

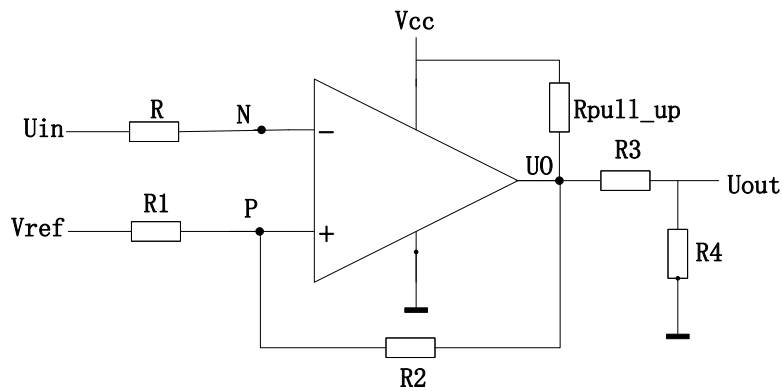
Vcc 选择, 分别选择 3.3V, 5V, 10V, 15V 等带入计算, 可得选择 Vcc=15V (比较适合) 带入

①②即可计算出

R1=1.4R2; Vref=10V。

要使 Uo 高电平 15V 时, Uout 输出 3.3V, 可选择 R3=11.7KΩ, R4=3.3KΩ 分压得到。

②



$$\text{通过计算可得 } U_{T1} = R_2 * V_{ref} / (R_1 + R_2) = 3V \quad \text{-----①}$$

$$U_{T2} = (R_2 * V_{ref} + V_{CC} * R_1) / (R_1 + R_2) = 24V \quad \text{-----②}$$

Vcc 可选择 28V (因为 Un 达到 24V, 电压电压必须大于 24V), 代入①②式可得

R1=3R2; Vref=12V。

要使 U0 高电平 28V 时, Uout 输出 3.3V, 可选择 R3=24.7K, R4=3.3K。

14) 说明什么是共模（单端信号）,什么是差模（差分信号）

见 3)

15) Op 参数里 CMRR 和 PMRR 具体物理含义?

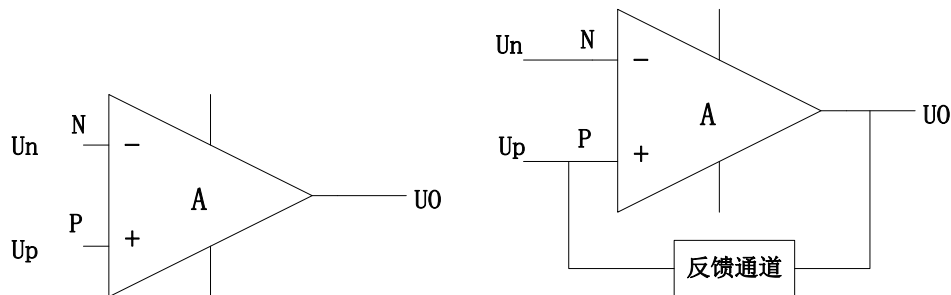
CMRR（共模抑制比）：运放的共模增益与差模增益比

PMRR（电源抑制比）：运放供电电压改变  $x$  伏时引起的输出电压变化量与差分输入改变  $Y$  伏时引起的输出电压相等，则  $PMRR=x/y$ 。

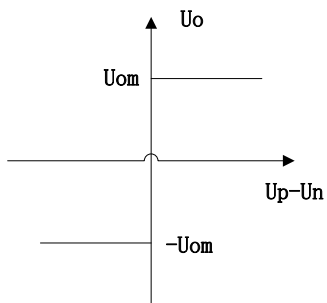
## 5. 电压比较器

电压比较器：将输入电压与参考电压进行比较，然后输出低电平或者高电平代表的两种电压。

电压比较器电路是使通用运放开环或者引入正反馈来实现，使运放工作在非线性区。



集成运放工作在非线性区电压特性

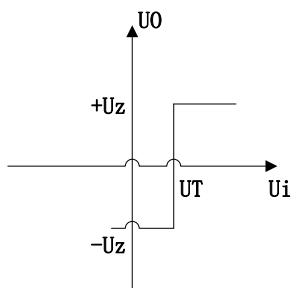


当集成运放工作在非线性区时， $U_p > U_n$  时，输出电压  $U_o = +U_{om}$ ，当  $U_p < U_n$  时，输出电压  $U_o = -U_{om}$ 。比较器的种类可分为单限比较器，滞回比较器和窗口比较器。

1) 单限比较器：

电路只有一个阈值电压，输入电压  $u_i$  逐渐增大或减小的过程中，当通过  $U_T$  时，输出电压  $u_o$  产生跃变，从高电平  $U_{OH}$  跃变为低电平  $U_{OL}$  或者从  $U_{OL}$  跃变为  $U_{OH}$ 。一般为开环电路。

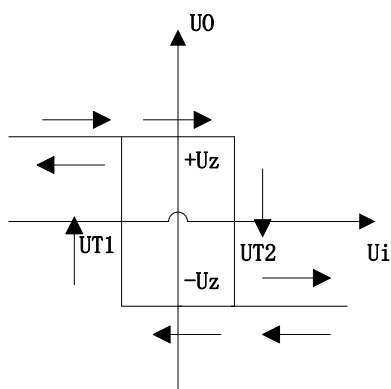
例:电压传输特性



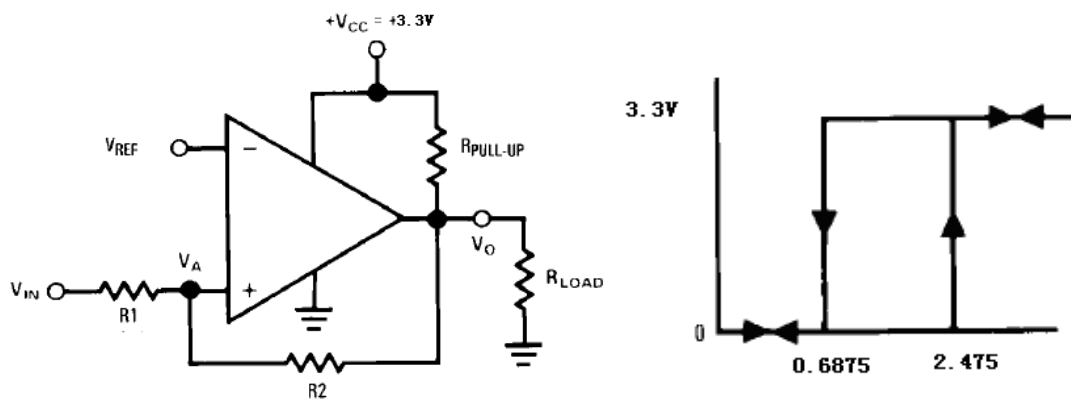
## 2) 滞回比较器:

电路有两个阈值电压，输入电压  $u_i$  从小变大过程中使输出电压产生跃变的阈值电压  $U_{T1}$ ，不等于从大到小过程中使输出电压  $u_o$  产生跃变的阈值电压  $U_{T2}$ ，电路具有滞回特性。滞回比较器电路中引入了正反馈。

例：电压传输特性（反向段输入电压  $u_i$ ）



例：一个滞回比较器电路



① 当  $U_p < U_n$  时，比较器输出低电平，因为是 3.3V 单电源供电，低电平为 0V。当  $U_p > U_n$  时，比较器输出高电平 3.3V。

② 根据计算可得  $U_{in} = (R_1 + R_2) * U_p / R_2 - R_1 * U_o / R_2$ ; 令  $U_p = U_n$ , 求出阈值电压  $U_T = (R_1 + R_2) * U_{REF} / R_2 - R_1 * U_o / R_2$ ;

— 当输出低电平时,  $U_o = 0$ , 则  $U_{T2} = (R_1 + R_2) * U_{REF} / R_2$ ;

— 当输出高电平时,  $U_o = V_{cc}$ , 则  $U_{T1} = (R_1 + R_2) * U_{REF} / R_2 - R_1 * V_{cc} / R_2$ ;

③  $u_i$  在正向端输入,  $U_i$  从小到大变化时, 刚开始时  $U_o$  低电平, 所以要等到  $U_i > U_{T2}$  时, 才  $U_p > U_n$ , 从低电平跃变到高电平; 当  $U_i$  从大到小变化时, 刚开始时  $U_o$  高电平, 所以要等到  $U_i < U_{T1}$  时, 才  $U_p < U_n$ , 从高电平跃变到低电平。

**计算参数:**

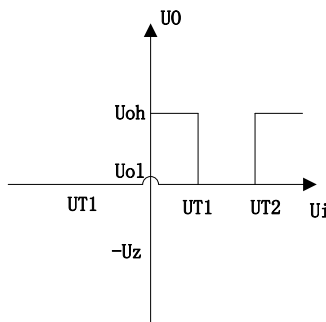
$$V_{in1} = \frac{V_{ref}(R_1 + R_2)}{R_2} = U_{T2} = 2.475 \quad \text{-----①}$$

$$V_{in2} = \frac{V_{ref}(R_1 + R_2) - V_{CC}R_1}{R_2} = U_{T1} = 0.6875 \quad \text{-----②}$$

由①②式可求出参数  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $V_{ref}$ 。

### 3) 窗口比较器

电路有两个阈值电压, 输入电压  $u_i$  从小变大或从大变小过程中使输出电压  $u_o$  产生两次跃变。



**分析电压传输特性三个要素的方法:**

① 通过研究集成运放输出端所接的限幅电路来确定电压比较器的输出低电平  $U_{OL}$  和输出高电平  $U_{OH}$ 。

② 写出集成运放同相输入段, 反向输入端电位  $U_p$  和  $U_n$  的表达式, 令  $U_p = U_n$ , 解得的输入电压就是阈值电压  $U_T$ 。

③  $U_o$  在  $U_i$  过  $U_T$  时的跃变方向决定于  $U_i$  作用于集成运放的那个输入端, 当  $U_i$  从反向输入端 (或通过电阻) 输入时,  $U_i < U_T$ ,  $U_o = U_{OH}$ ;  $U_i > U_T$ ,  $U_o = U_{OL}$ ; 同相输入是相反,  $U_i < U_T$ ,  $U_o = U_{OL}$ ;  $U_i > U_T$ ,  $U_o = U_{OH}$ 。

## 6. 电压跟随器

**电压跟随器定义：**就是输出电压与输入电压是相同的，就是说，电压跟随器的电压放大倍数恒小于且接近 1。

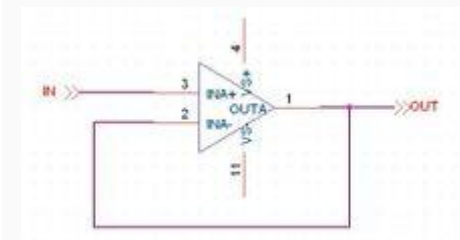
**电压跟随器特点：**输入阻抗高，而输出阻抗低，一般来说，输入阻抗要达到几兆欧姆是很容易做到的。输出阻抗低，通常可以到几欧姆，甚至更低。

在电路中，电压跟随器一般做缓冲级(buffer)及隔离级。因为，电压放大器的输出阻抗一般比较高，通常在几千欧到几十千欧，如果后级的输入阻抗比较小，那么信号就会有相当的部分损耗在前级的输出电阻中。在这个时候，就需要电压跟随器来从中进行缓冲。起到承上启下的作用。应用电压跟随器的另外一个好处就是，提高了输入阻抗，这样，输入电容的容量可以大幅度减小，为应用高品质的电容提供了前提保证。

电压跟随器的另外一个作用就是隔离，在 HI-FI 电路中，关于负反馈的争议已经很久了，其实，如果真的没有负反馈的作用，相信绝大多数的放大电路是不能很好的工作的。但是由于引入了大环路负反馈电路，扬声器的反电动势就会通过反馈电路，与输入信号叠加。造成音质模糊，清晰度下降，所以，有一部分功放的末级采用了无大环路负反馈的电路，试图通过断开负反馈回路来消除大环路负反馈的带来的弊端。但是，由于放大器的末级的工作电流变化很大，其失真度很难保证。

在这里，电压跟随器的作用正好达到应用，把电路置于前级和功放之间，可以切断扬声器的反电动势对前级的干扰作用，使音质的清晰度得到大幅度提高。

**电压跟随器的电路图：**



**电压跟随器作用：**电压跟随器起缓冲、隔离、提高带载能力的作用。

共集电路的输入高阻抗，输出低阻抗的特性，使得它在电路中可以起到阻抗匹配的作用，能够使得后一级的放大电路更好的工作。举一个应用的典型例子：电吉他的信号输出属于高阻，接入录音设备或者音箱时，在音色处理电路之前加入这个电压跟随器，会使得阻抗匹配，音色更加完美。很多电吉他效果器的输入部分设计都用到了这个电路。

电压隔离器输出电压近似输入电压幅度，并对前级电路呈高阻状态，对后级电路呈低阻状态，因而对前后级电路起到“隔离”作用。

电压跟随器常用作中间级，以“隔离”前后级之间的影响，此时称之为缓冲级。基本原

理还是利用它的输入阻抗高和输出阻抗低之特点。

电压跟随器的输入阻抗高、输出阻抗低特点，可以极端一点去理解，当输入阻抗很高时，就相当于对前级电路开路；当输出阻抗很低时，对后级电路就相当于一个恒压源，即输出电压不受后级电路阻抗影响。一个对前级电路相当于开路，输出电压又不受后级阻抗影响的电路当然具备隔离作用，即使前、后级电路之间互不影响。